

УДК 624.131.536

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-3-44-53

© В. В. Конюшков, канд. техн. наук, доцент

© V. V. Konyushkov, PhD in Sci. Tech, Associate Professor

© С. Н. Сулейманова, магистрант

© S. N. Suleymanova, undergraduate

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: v.konyushkov@yandex.ru, sabina.syl@mail.ru

E-mail: v.konyushkov@yandex.ru, sabina.syl@mail.ru

УЧЕТ ПЕРЕУВЛАЖНЕНИЯ ГРУНТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ НАГЕЛЬНОГО КРЕПЛЕНИЯ СКЛОНОВ

CONSIDERATION OF EXCESSIVE WATER SATURATION OF SOIL IN THE DESIGN OF NAIL SLOPE SUPPORT

Нагельное крепление склонов зарекомендовало себя как эффективное мероприятие инженерной защиты, которое применяется для повышения устойчивости склонов, и предполагает устройство буроинъекционных грунтовых нагелей совместно с гибкой покровной системой. Рассмотрено усовершенствование существующей методики проектирования конструкции такого типа: оценка общей устойчивости склона, оценка местной устойчивости поверхностного слоя с учетом увлажнения грунтов, проверка прочности нагеля по грунту и материалу, а также проверка прочности нагельного крепления (грунтового нагеля и стальной сети) на срез. Для этого был выполнен подбор нагельного крепления для рассматриваемого инженерно-геологического разреза с использованием ПК Plaxis 2D и аналитических методов расчета устойчивости. Авторами статьи также предложен метод, который можно использовать для определения прочностных характеристик грунтов поверхностного слоя грунтов с учетом их переувлажнения.

Ключевые слова: общая устойчивость, местная устойчивость, нагельное крепление, прочность нагеля по грунту и по материалу, прочность грунтового нагеля и сети на срез, увлажнение грунтов.

Nail slope support has proven itself as an effective engineering protection measure, which is used to increase the stability of slopes, and involves the installation of drilling-injection ground nails together with a flexible cover system. The article considers the issue of improving the existing design methodology of this type of structure, which will include an assessment of the overall stability of the slope, an assessment of the local stability of the surface layer, considering soil moisture saturation, checking the strength of the nail on the ground and material, as well as checking the strength of the nail attachment (ground nail and steel network) on slice. To achieve this goal, there was carried out a selection of soil nailing support for the considered engineering-geological section using the Plaxis 2D PC and there was offered an analytical method for calculating slope stability. The authors also propose a method that can be used for assessing the strength characteristics of soils of the surface layer, considering excessive soil water saturation.

Keywords: general stability, local stability, soil nailing, the strength of the nail on the ground and on the material, the strength of the ground nail and the network on the cut, soil water saturation.

Введение

Основной проблемой существующей методики проектирования нагельных креплений является то, что при подборе оценивается только общая устойчивость склона. Однако многими исследователями была доказана необходимость расчетов местной устойчивости поверхностного слоя, который

в большей мере подвержен сезонному воздействию атмосферных осадков и процессов снеготаяния¹ [1–10]. Кроме того, еще одним недостатком методики выступает отсутствие способа учета срезающих усилий, возникающих в конструктивных элементах нагельного крепления. В данной статье предложена

¹ GEO. Guide to Soil Nail Design and Construction: (Geoguide 7). Hong Kong: CEDD, 2008. 100 p.

усовершенствованная методика подбора нагельных креплений, которая представляет собой последовательность проектирования таких систем с учетом оценки общей и местной устойчивости склона, а также проверки прочности элементов конструкции на выдергивание, разрыв и срез.

Разработанная методика будет описана на примере инженерно-геологического разреза, представленного на рис. 1.

Рассматриваемый геологический разрез проходит через опору канатной дороги, на которую действует трапециевидная нагрузка $q_1 = 28 \text{ кН/м}$; $q_2 = 122 \text{ кН/м}$. Физико-

механические характеристики грунтов, слагающих склон, приведены в табл. 1.

1. Оценка общей устойчивости склона с учетом нагельного крепления

Проектирование нагельного крепления следует начинать с оценки общей устойчивости склона. Основным условием на первом шаге подбора выступает обеспечение нормативного коэффициента запаса устойчивости:

$$k_{st} \geq [k_{st}]; \quad (1)$$

$$[k_{st}] = \frac{\gamma_n \Psi}{\gamma_d}, \quad (2)$$

где $[k_{st}]$ — нормированное значение коэффициента устойчивости склона (откоса); γ_n — коэф-

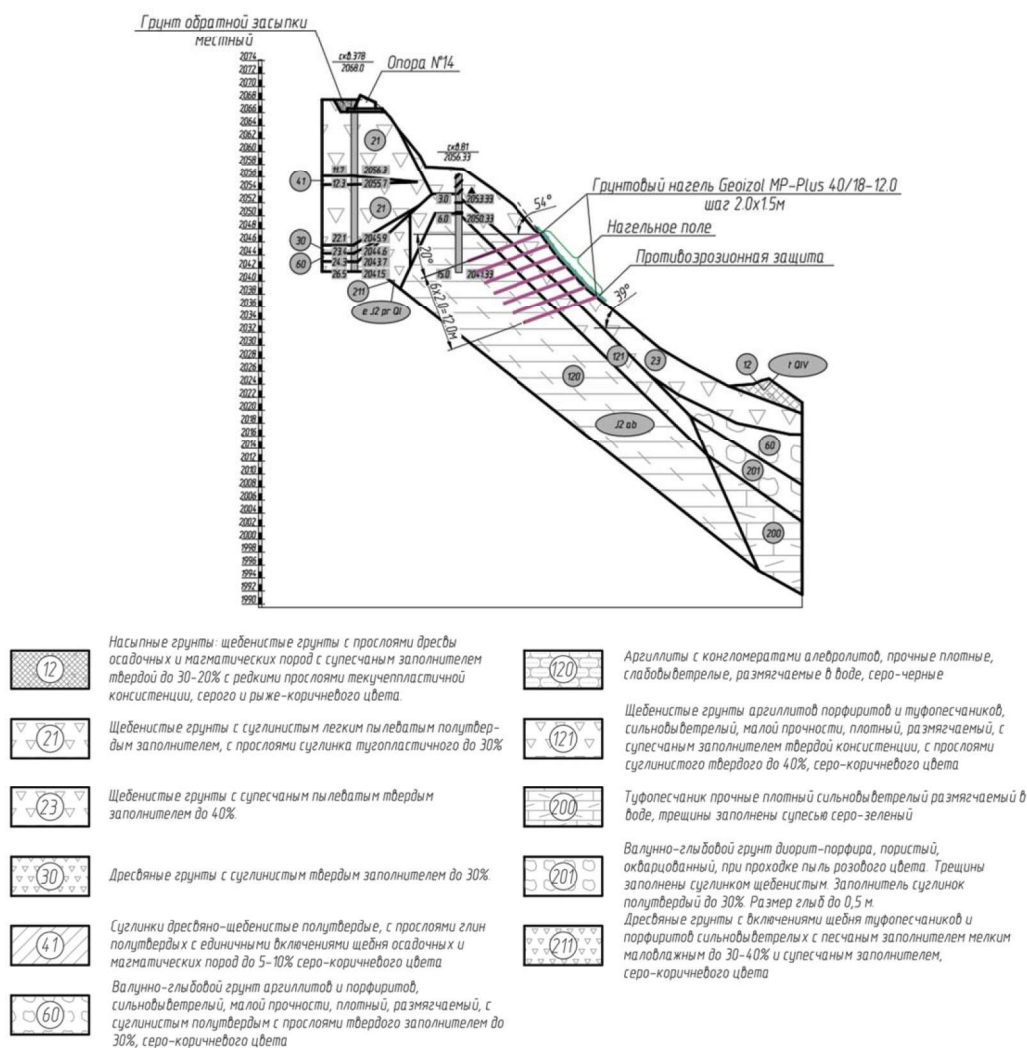


Рис. 1. Рассматриваемый инженерно-геологический разрез, проходящий через опору канатной дороги

Таблица 1

Физико-механические характеристики грунтов, слагающих склон

№ ИГЭ	Удельный вес грунта γ , кН/м ³	Удельный вес грунта в водонасыщенном состоянии γ_{sat} , кН/м ³	Удельное сцепление c , кПа	Угол внутреннего трения φ , град	Модуль деформации E , МПа	Коэффициент Пуассона ν	Коэффициент пористости e
12	20,90	21,55	27	19	14,1	0,32	0,4190
21	20,21	20,21	48	27	18,7	0,35	0,550
23	21,19	21,80	36	27	17,2	0,27	0,346
30	21,19	21,40	57	17	20,7	0,35	0,388
41	18,74	19,20	21	30	13,4	0,35	0,687
60	25,41	25,9	41	23	46,0	0,20	0,110
121	21,09	22,0	18	32	34,8	0,27	0,301
201	26,88	27,10	51	26	53,0	0,22	0,050
211	23,05	23,05	21	23	20,5	0,30	0,252
120	25,90	26,10	200	35	200,0	0,20	0,037
200	26,39	26,80	40	23	200	0,20	0,080

коэффициент надежности по ответственности сооружения; γ_d — коэффициент условий работы; ψ — коэффициент сочетания нагрузок.

Канатная дорога является сооружением повышенного уровня ответственности, поэтому для рассматриваемого случая принимаются следующие значения нормативного коэффициента запаса $[k_{st}]$:

- основное сочетание

$$[k_{st}] = \frac{\gamma_n \psi}{\gamma_d} = \frac{1,2 \cdot 1,0}{0,9} = 1,33;$$

- особое сочетание

$$[k_{st}] = \frac{\gamma_n \psi}{\gamma_d} = \frac{1,2 \cdot 0,95}{0,9} = 1,27.$$

Подбор параметров нагельного крепления (наклонный и горизонтальный шаг грунтовых нагелей, их длина, диаметр) осуществляется путем итерационного расчета устойчивости с применением различных методов. В рамках работы подбор производился при помощи численного моделирования в ПК Plaxis 2D, результаты расчетов можно увидеть на рис. 2.

2. Проверка прочности нагеля по грунту и по материалу

Далее необходимо выполнить проверку несущей способности нагельных креплений по грунту и по материалу. Усилия в грунтовых нагелях определяются комплексным

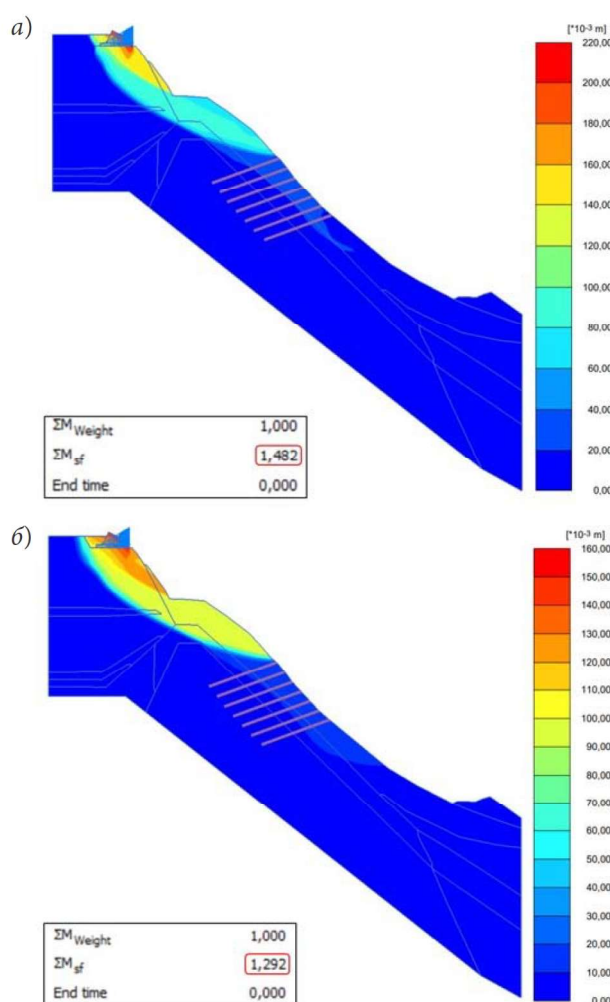


Рис. 2. Расчет теоретической поверхности обрушения склона в ПК Plaxis 2D: а — при основном сочетании нагрузок, $k_{st} = 1,482 \geq [k_{st}] = 1,330$; б — при особом сочетании нагрузок, $k_{st} = 1,292 \geq [k_{st}] = 1,270$

расчетом удерживающих конструкций совместно со склоном, что можно увидеть на рис. 3.

Основными условиями являются обеспечение прочности нагелей:

- по грунту:

$$R_{a,k} = \pi D_k l_k (1 + \sin \varphi_1) \cdot (\sigma_{0g} \operatorname{tg} \varphi_1 + c_1) K_p \gamma_c; \quad (3)$$

$$F_j \leq \frac{R_{a,k}}{\gamma_m}, \quad (4)$$

где F_j — расчетная допускаемая нагрузка на анкер по грунту, кН; D_k и l_k — диаметр и длина корня анкера соответственно; φ_1 и c_1 — расчетные средневзвешенные значения угла внутреннего трения и сцепления грунта по длине корня анкера соответственно; γ_c — коэффициент условий работы, принимаемый для песчаных грунтов равным 0,72, для пылевато-глинистых — 0,64; γ_m — коэффициент надежности по грунту; σ_{0g} — усредненное по боковой поверхности корня анкера природное напряжение грунта;

- по материалу металлической штанги:

$$F_j < \frac{A_n R_y \gamma_c}{\gamma_m}, \quad (5)$$

где A_n — площадь сечения грунтового нагеля нетто; R_y — расчетное сопротивление стали растяжению по пределу текучести; γ_m — ко-

эффициент надежности по материалу; γ_c — коэффициент условий работы.

Результаты расчетов приведены в табл. 2. Как видно из таблицы, нагели успешно проходят проверки по грунту и по материалу.

3. Расчеты нагельных креплений с учетом переувлажнения грунтов

Поверхностный слой грунта склона подвержен сезонному негативному воздействию атмосферных осадков: дождей, снеготаяния и поверхностных стоков. Для того чтобы учесть сезонное переувлажнение грунтов склона, предлагается метод, основанный на взаимосвязи прочностных характеристик грунта и влажности. Каждый тип грунта имеет свой интервал переувлажнения и соответственно свой коэффициент снижения прочностных характеристик, что представлено на рис. 4 [11].

4. Учет переувлажнения грунтов при расчете прочности грунтового нагеля на срез

Срезающее усилие при проверке нагельных креплений определяется путем проецирования всех действующих удерживающих и сдвигающих усилий рассматриваемого участка на наклонную плоскость (рис. 5):

$$S_d = G \sin \pm Q_c + F_w - T - S, \quad (6)$$

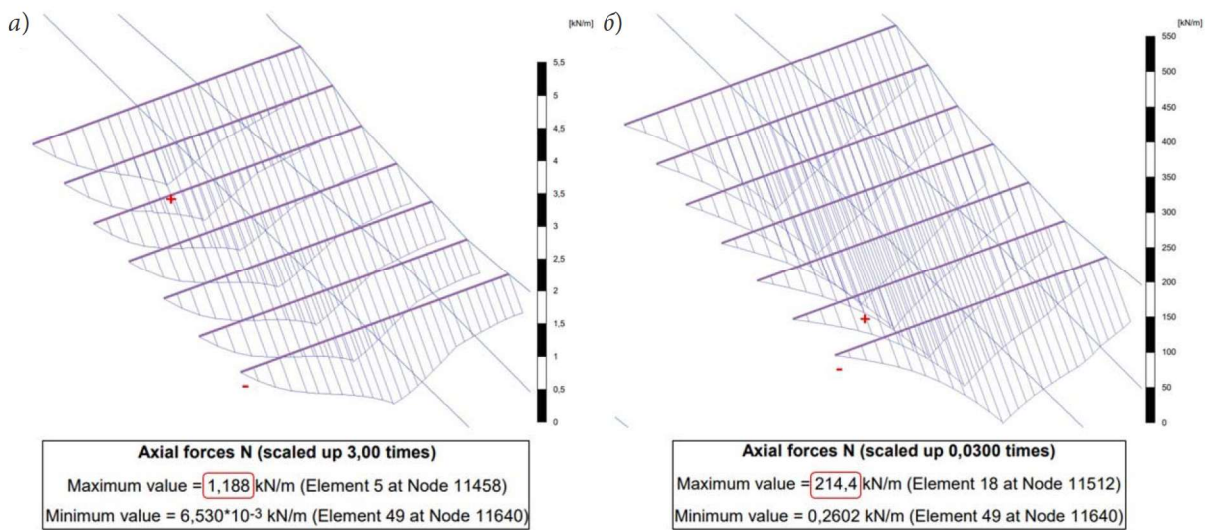


Рис. 3. Эпюры усилий в грунтовых анкерах: а — при основном сочетании нагрузок ($N_{\max} = 1,19$ кН/м); б — при особом сочетании нагрузок ($N_{\max} = 110,8$ кН/м)

Результаты оценки несущей способности нагелей по грунту и по материалу

Сочетание нагрузок	Максимальное расчетное усилие в анкерах с учетом шага $F_{j,max}$, Т	Прочность анкера по материалу с учетом коэффициента надежности $\frac{A_n R_y \gamma_c}{\gamma_m}$, Т	Несущая способность анкера по грунту с учетом коэффициента надежности $\frac{R_{a,k}}{\gamma_m}$, Т
Основное	0,18	37,65	47,47
Особое	16,94	41,24	101,30

где S_d — усилие сдвига в грунтовом нагеле, кН; s_v — вертикальный шаг нагелей, м; s_h — горизонтальный шаг нагелей, м; t — толщина поверхностного слоя, принимается равной глубине промерзания; $G = \gamma' s_v t s_h$ — сила собственного веса рассматриваемого участка, кН; $F_w = s_v t s_h \gamma_w \sin \alpha$ — сила от движения воды, кН; $N = G \cos \alpha$ — нормальная реакция опоры, кН; $T = N \tan \varphi_w$ — сила трения, кН; $Q_c = \mu G = K_0 K_1 A G$ — сила сейсмического воздействия, кН; $S = c_w A = c_w s_v s_h$ — сила сцепления, кН; c_w и φ_w — прочностные характеристики грунтов с учетом переувлажнения.

Тогда при проверке грунтового нагеля на срез достаточно доказать, что несущая спо-

собность стержня к деформациям сдвига больше, чем расчетное сопротивление срезу отдельного нагеля:

$$S_d \leq \frac{S_R}{\gamma_{SR}}, \quad (7)$$

где S_R — нормативное значение сопротивления нагеля сдвигу, кН; γ_{SR} — нормативный коэффициент условий работы, принимаемый равным 1,5.

$$S_R = \tau_y A; \quad (8)$$

$$\tau_y = \frac{f_y}{\sqrt{3}}, \quad (9)$$

где τ_y — предел текучести при деформации сдвига, кН/м²; f_y — предел текучести при растяжении; A — площадь сечения грунтового нагеля.

5. Учет переувлажнения грунтов при расчете местной устойчивости склона

На рис. 6 представлена схема для расчета местной устойчивости склона с учетом переувлажнения грунтов.

Расчетный коэффициент запаса устойчивости в этом случае рассчитывается по следующей формуле:

$$k_{st} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n T_i + \sum_{i=1}^n S_i + \sum_{i=1}^n G_{yд,i} \sin \alpha + \sum_{i=1}^n S_{d,yд,i} \right)}{\left(\sum_{i=1}^n S_{d,сд,i} + \sum_{i=1}^n G_{сд,i} \sin \alpha + \sum_{i=1}^n Q_{c,i} + \sum_{i=1}^n F_{w,i} \right)}; \quad (10)$$

$$G_i = \gamma'_i h_i b_i; \quad (11)$$

$$F_{w,i} = h_i b_i \gamma_w \sin \alpha; \quad (12)$$

$$T_i = N_i \tan \varphi_w; \quad (13)$$

$$N_i = G_i \cos \alpha_i; \quad (14)$$

$$S_i = c_{w,i} A = c_{w,i} h_i b_i; \quad (15)$$

$$Q_{c,i} = \mu G_i = K_0 K_1 A G_i. \quad (16)$$

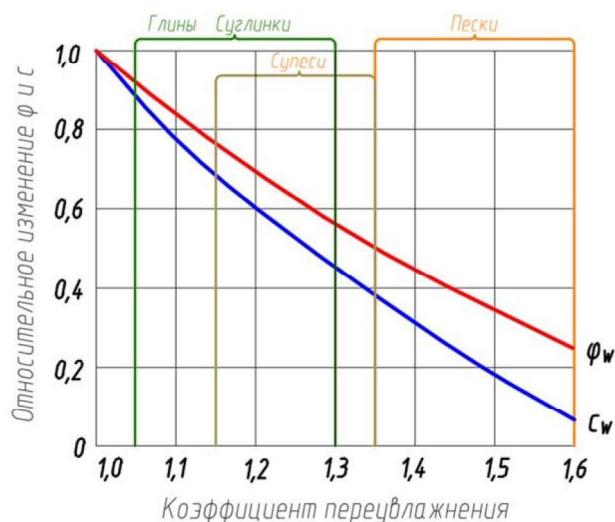


Рис. 4. График зависимости коэффициента переувлажнения для различных видов грунтов

Примечание. Интервалы значений коэффициента переувлажнения интерполируются в зависимости от процентного содержания глинистых частиц для глинистых грунтов и коэффициента пористости для песков (глинистые грунты тяжелые/легкие; пылеватые пески плотные / средней плотности / рыхлые)

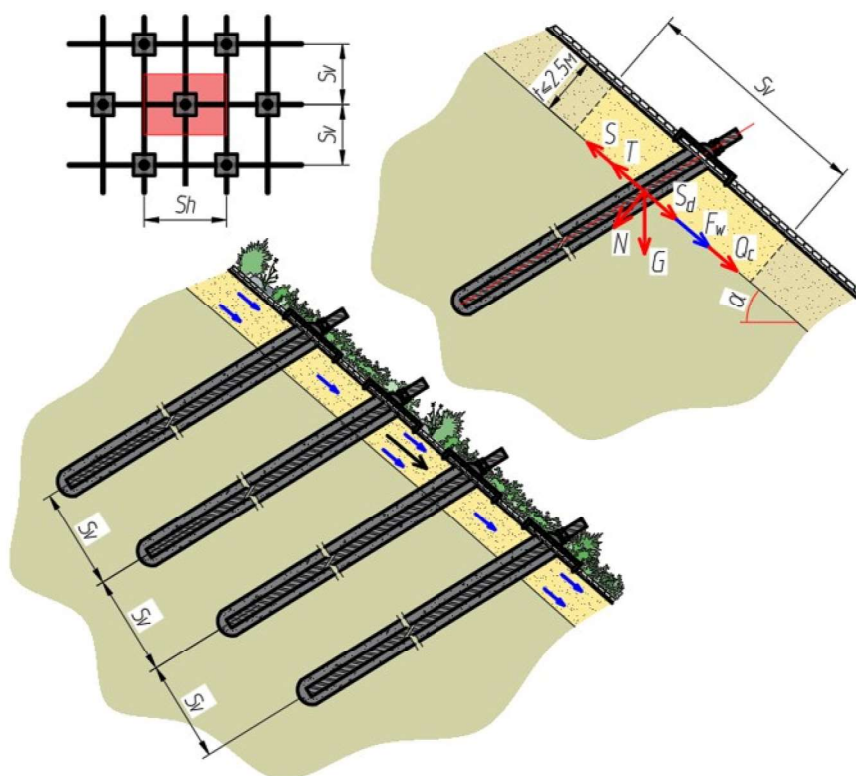


Рис. 5. Схема для проверки прочности отдельного нагеля на срез

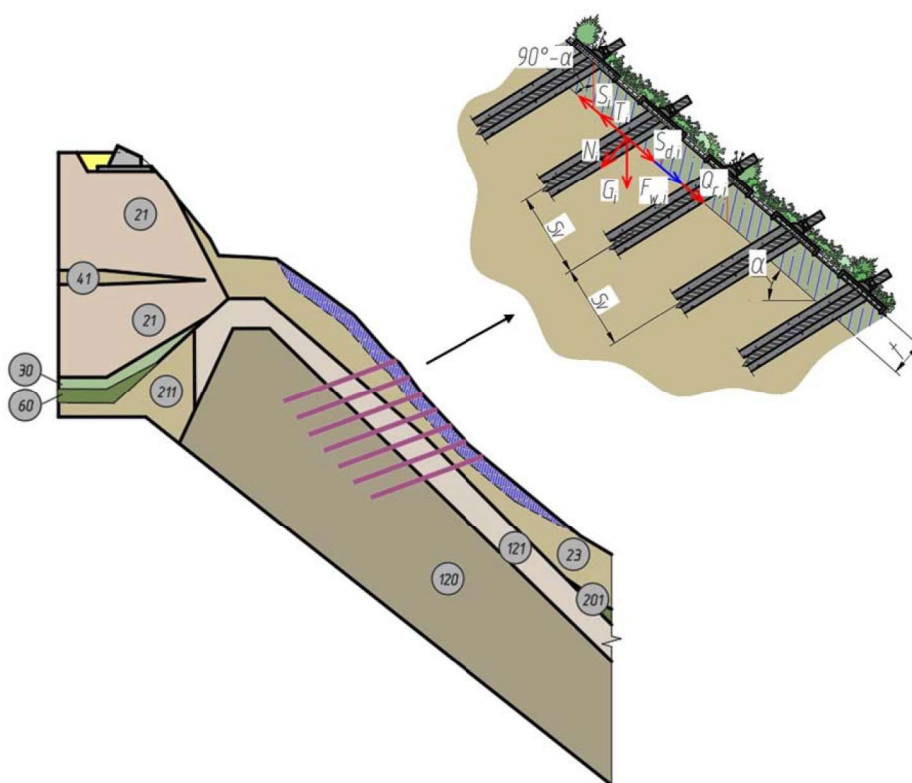


Рис. 6. Схема для расчета местной устойчивости поверхностного слоя с учетом переувлажнения грунтов

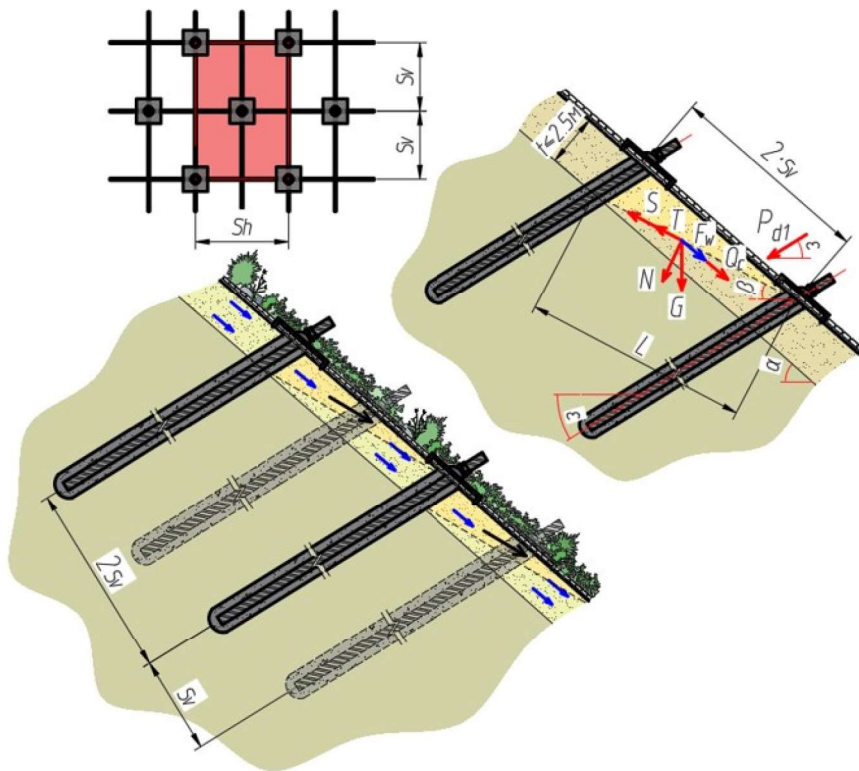


Рис. 7. Проверка прочности сети между нагелями. Случай А

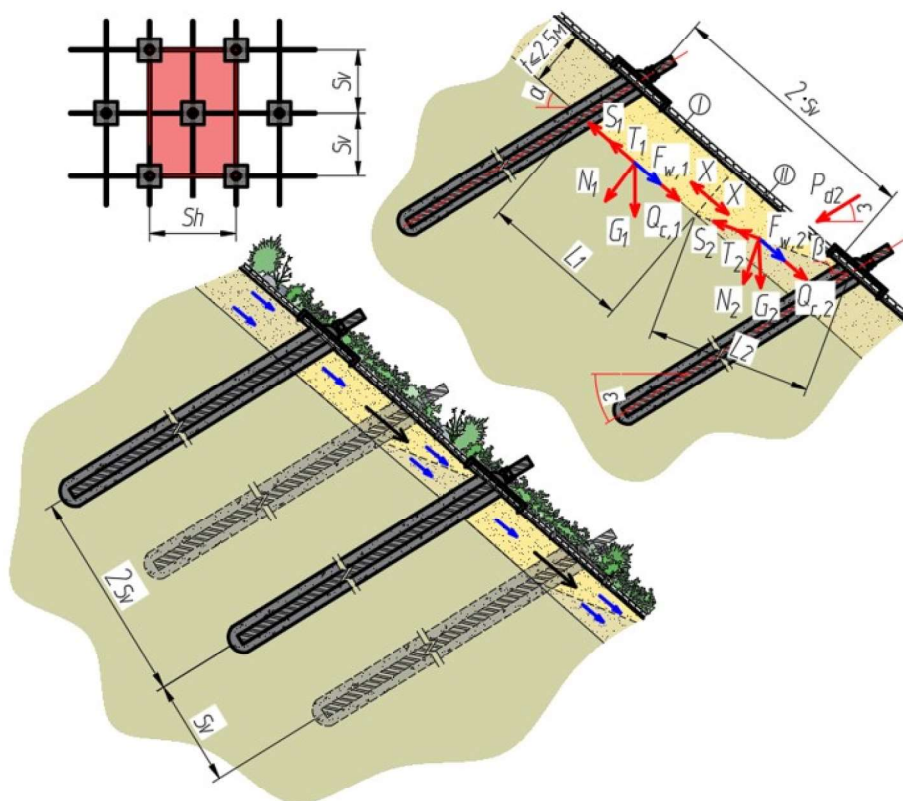


Рис. 8. Проверка прочности сети между нагелями. Случай Б

Результаты оценки местной устойчивости поверхностного слоя, а также прочности нагеля и сети на срез с учетом переувлажнения грунтов

Проверка	Результат расчета
Проверка грунтового нагеля на срез	$S_d = 118,7 < \frac{S_R}{\gamma_{SR}} = 202,6 \text{ кН}$
Оценка местной устойчивости поверхностного слоя	$k_{st} = 1,300 > [k_{st}] = 1,27$
Проверка прочности сети на срез по наклонному краю пластины	$P_{d1} = 54,7 \text{ кН};$ $P_{d,\max} = P_{d2} = 78,1 \text{ кН} < \frac{P_R}{\gamma_{PR}} = \frac{140,0}{1,5} = 93,3 \text{ кН}$

При этом условием обеспечения местной устойчивости поверхностного слоя выступает

$$k_{st} \geq [k_{st}]. \quad (17)$$

6. Учет переувлажнения грунтов при расчете прочности сети на срез по наклонному краю пластины

Проверка прочности сети на срез по наклонному краю пластины выполняется аналогично расчету нагеля. Однако в этом случае необходимо рассмотреть две возможные схемы разрушения поверхностного слоя, по которым определяется максимальное срезающее усилие, действующее на сеть.

Случай А — плоская поверхность скольжения (рис. 7):

$$P_{d,A} = \frac{G \sin \beta + Q_c + F_w \cos(\alpha - \beta) - [T + S]}{\cos(\beta + \varepsilon) + \sin(\beta + \varepsilon) \tan \varphi_w}; \quad (18)$$

$$T = N \tan \varphi_w; \quad (19)$$

$$N = G \cos \beta; \quad (20)$$

$$S = c_w A = c_w L s_h. \quad (21)$$

При рассмотрении случая Б (ломаная поверхность скольжения) необходимо учесть силу контакта между двумя рассматриваемыми блоками (рис. 8):

$$X = G_1 \sin \alpha + F_{w,1} + Q_{c,1} - T_1 - S_1; \quad (22)$$

$$P_{d,B} = \frac{\left(G_2 \sin \beta + Q_{c,2} + X \cos(\alpha - \beta) + F_{w,2} \cos(\alpha - \beta) - [T_2 + S_2] \right)}{\cos(\beta + \varepsilon) + \sin(\beta + \varepsilon) \tan \varphi_w}. \quad (23)$$

Максимальное значение срезающей силы, определяемое расчетами по этим двум схемам, сравнивается с несущей способностью сети против среза:

$$P_{d,\max} \leq \frac{P_R}{\gamma_{PR}}, \quad (24)$$

где P_R — несущая способность сети против среза в направлении грунтового нагеля, определяемая с помощью испытаний для конкретного случая, кН; γ_{PR} — коэффициент условий работы, принимаемый равным 1,5.

Для расчетов сети и нагеля на срез, а также местной устойчивости поверхностного слоя для рассматриваемого разреза прочностные характеристики ИГЭ-23 были откорректированы в соответствии с рис. 4. При этом коэффициент переувлажнения равен 1,34.

$$A_w = K_c c = 0,40 \cdot 36 = 14,4 \text{ кПа}; \quad (25)$$

$$\varphi_w = K_\varphi \varphi = 0,51 \cdot 27^\circ = 13,8^\circ. \quad (26)$$

Результаты оценки местной устойчивости поверхностного слоя, а также проверки прочности грунтового нагеля и сети на срез с учетом переувлажнения грунта приведены в табл. 3. Как видно из таблицы, соответствующие условия проверки для рассматриваемого случая успешно выполняются.

Заключение

1. В настоящей работе приведена методика подбора нагельного крепления склонов, которая представляет собой последовательность проектирования с учетом оценки общей и местной устойчивости склона, прочности нагеля по грунту и по материалу, а также оценки прочности нагельного крепления на срез.

2. При оценке местной устойчивости поверхностного слоя склонов наибольшее влияние на коэффициент устойчивости ока-

зывает увлажнение грунтов. В статье предложен метод учета снижения прочностных характеристик грунтов с увеличением влажности на основе научных исследований грунтов отечественных и зарубежных ученых.

Библиографический список

1. Manyakhin I. V., Mangushev R. A. Stability of slopes under exposure to soil wetting // *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction*. London: Taylor & Francis Group, 2019. ISBN 978-0-367-17983-0. 2019. Pp. 172–177.
2. Cala M., Flum D., Roduner A., Rüegger R., Wartmann S. *TECCO Slope Stabilization System. / Summary of Published Technical Papers*. 1998–2011. Switzerland: Geobruagg, AG, 2011. 267 p.
3. Ortigao J. A. R., Sayao A. S. F. J. *Handbook of Slope Stabilization*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 2004. 478 p.
4. Rüegger R., Flum D. Slope stabilization with high-performance steel wire meshes in combination with nails and anchors // *Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference*. 2000. Pp. 3–38.
5. Конюшков В. В. Сравнение результатов численного моделирования устойчивости откосов в программе Plaxis с аналитическими расчетами по упрощенному методу // *Вестник гражданских инженеров*. 2018. № 3 (80). С. 108–115.
6. Конюшков В. В. Инженерная защита территорий от склоновых процессов с учетом природных условий и техногенных воздействий // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 2 (61). С. 137–142.
7. Джаманбаев М. Д., Омуралиев С. Б. Влияние влажности на устойчивость склона и прочностные свойства суглинистых грунтов // *Проблемы современной науки и образования*. 2017. № 5 (87). С. 116–119.
8. Барвашов В. А., Иовлев В. М. Метод расчета нагельного крепления грунтовых откосов // *Геотехника*. 2011. № 5. С. 44–53.
9. Конюшков В. В., Владимирова Е. И. Анализ и прогноз устойчивости склона в природном состоянии, на строительный и эксплуатационный периоды // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 6 (65). С. 107–113.
10. Конюшков В. В., Пятница А. В. Численное моделирование вариантного проектирования инженерной защиты территории от склоновых процессов // *Вестник гражданских инженеров*. 2018. № 2 (67). С. 100–105.
11. Воробьев А. В., Дергачев Г. В., Конюшков В. В. Аналитические и численные методы учета переувлажнения грунтов земляного полотна // *Материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. «Современные ме-*

тоды проектирования и эксплуатации железнодорожного пути». Москва, 31 марта – 1 апреля 2016 г. М.: Московский гос. ун-т путей сообщения Императора Николая II, 2016. С. 79–83.

References

1. Manyakhin I. V., Mangushev R. A. Stability of slopes under exposure to soil wetting. *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction*, London, Taylor & Francis Group Publ., 2019, pp. 172–177. ISBN 978-0-367-17983-0.2019
2. Cala M., Flum D., Roduner A., Rüegger R., Wartmann S. *TECCO slope stabilization system*. Summary of published technical papers, 1998–2011. Switzerland, Geobruagg, AG, 2011, 267 p.
3. Ortigao J. A. R., Sayao A. S. F. J. *Handbook of slope stabilization*. Berlin; Heidelberg; New York, Springer-Verlag Publ., 2004, 478 p.
4. Rüegger R., Flum D. *Slope stabilization with high-performance steel wire meshes in combination with nails and anchors*. Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference, 2000, pp. 3–38.
5. Konyushkov V. V. *Sravnienie rezul'tatov chislennogo modelirovaniya ustoychivosti otkosov v programme Plaxis s analiticheskimi raschetami po uproshchennomu metodu* [Comparing the results of numerical modeling of slope stability in the PLAXIS program with analytical calculations using the simplified method]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no. 3 (80), pp. 108–115.
6. Konyushkov V. V. *Inzhenernaya zashchita territoriy ot sklonovykh protsessov s uchetom prirodnnykh usloviy i tekhnogennykh vozdeystviy* [Engineering protection of territories from slope shift processes taking into account natural conditions and technogenic loads]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 2 (61), pp. 137–142.
7. Dzhamanbaev M. D., Omuraliev S. B. *Vliyanie vlazhnosti na ustoychivost' sklona i prochnostnye svoystva suglinistykh gruntov* [The influence of humidity on slope stability and strength properties of loamy soils]. *Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya – Problems of modern science and education*, 2017, no. 5 (87), pp. 116–119.
8. Barvashov V. A., Iovlev V. M. *Metod rascheta nagel'nogo krepneniya gruntovykh otkosov* [Method of calculation of soil slope nail supports]. *Geotekhnika – Geoengineering*, 2011, no. 5, pp. 44–53.
9. Konyushkov V. V., Vladimirova E. I. *Analiz i prognoz ustoychivosti sklona v prirodnom sostoyanii, na stroitel'nyy i ekspluatatsionnyy periody* [Analysis and forecasting of the slope stability in natural conditions for construction and operation periods]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 6 (65), pp. 107–113.

10. Konyushkov V. V., Pyztnitsa A. V. *Chislennoe modelirovanie variantnogo proektirovaniya inzhenernoy zashchity territorii ot sklonovykh protsessov* [Numerical simulation of the alternative design of territory engineering protection measures against landslide processes]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no. 2(67), pp. 100–105.

11. Vorob'ev A. V., Dergachev G. V., Konyushkov V. V. *Analiticheskie i chislennye metody ucheta pereuvlazhneniya gruntov zemlyanogo polotna* [Analytical and numerical

methods for accounting for water logging of subgrade soil base]. *Trudy XIII Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Sovremennye metody proektirovaniya i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti»*, Moskva, 31 marta — 1 aprelya 2016 g. [Proceedings of the XIII International sci. – tech. conf. “Modern methods of designing and operating a railway track”, Moscow, March 31 – April 1, 2016]. Moscow, Moskovskiy gos. un-t putey soobshcheniya Imperatora Nikolaya II Publ., 2016, pp. 79–83.